

IMPLEMENTASI *MODEL REFERENCE ADAPTIVE SYSTEMS* (MRAS) UNTUK KESTABILAN PADA *ROTARY INVERTED* PENDULUM

Aretasiwi Anyakrawati, Pembimbing 1: Goegoes D.N, Pembimbing 2: Purwanto.

Abstrak- Pendulum terbalik mempunyai karakteristik tidak stabil dan nonlinear sehingga harus dilakukan proses linearisasi dari *plant* nonlinear tersebut. Pendulum terbalik memiliki titik berat berada di atas titik tumpunya sehingga secara aktif harus disetimbangkan agar kondisinya tetap tegak dengan cara menggerakkan lengan pendulum secara rotasional. Untuk keperluan tersebut, pada penelitian ini digunakan *Model Reference Adaptive Systems* (MRAS) untuk kestabilan pada *Rotary Inverted Pendulum*. *Model Reference Adaptive Systems* merupakan salah satu metode pengontrolan yang membuat keluaran sistem yang diatur sedemikian rupa sehingga mempunyai perilaku yang sama dengan model referensi yang diberikan, dengan cara mengubah-ubah nilai parameter kontrolernya. Pendulum terbalik dapat mengambil keputusan dengan bergerak ke kanan atau ke kiri sesuai dengan arah kemiringannya dengan kecepatan tertentu untuk menjaga kestabilan pendulum terbalik. Pada pengujian pendulum terbalik rata-rata dapat mempertahankan kestabilannya selama 4 detik.

Kata Kunci— Kestabilan, *Rotary Inverted Pendulum*, MRAS, *Rotary Encoder*

I. PENDAHULUAN

Pendulum terbalik memiliki karakteristik tidak stabil dan nonlinier sehingga harus dilakukan proses linearisasi dari *plant* nonlinear tersebut. Pendulum terbalik memiliki titik berat di atas titik tumpunya, sehingga secara aktif harus disetimbangkan agar kondisinya tetap tegak dengan cara menggerakkan lengan pendulum secara rotasional dengan kendali umpan balik.[1]

Pendulum terbalik yang digunakan adalah *Rotary Inverted Pendulum* yang menggunakan lintasan berbentuk lingkaran, bertujuan untuk menghilangkan batasan lintasan yang terjadi pada pendulum terbalik dengan lintasan lurus sehingga pendulum dapat disetimbangkan dengan leluasa.

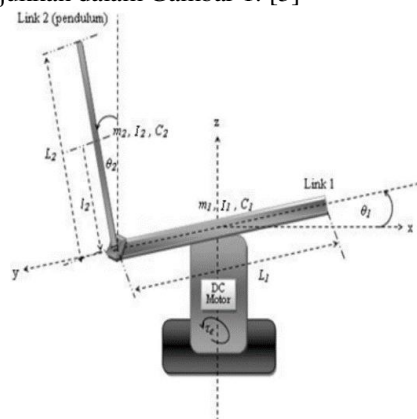
Pada skripsi ini menggunakan input dari sensor rotary encoder pada rod dan rotary encoder pada motor. Penelitian ini bertujuan untuk

mengembangkan perancangan yang sebelumnya, yaitu merancang model sistem *rotary inverted pendulum* yang dapat berputar dua arah dan menggunakan metode pengontrolan *Model Reference Adaptive Systems* (MRAS) untuk pergerakan lengan pendulum dalam menjaga kestabilan sistem.[2]

II. IDENTIFIKASI SISTEM

A. *Rotary Inverted Pendulum*

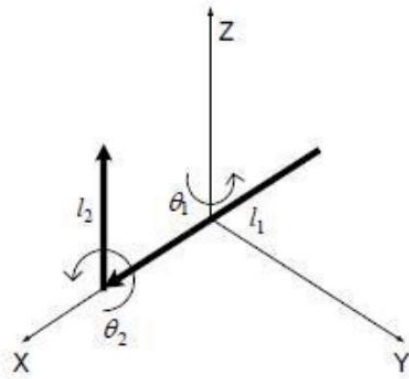
Motor DC digunakan untuk menerapkan torsi τ_e ke lengan 1. Link antara lengan 1 dan lengan 2 tidak digerakkan tetapi bebas untuk berputar. Kedua lengan memiliki panjang L_1 dan L_2 . Lengan memiliki massa m_1 dan m_2 yang berlokasi masing-masing di l_1 dan l_2 , yang merupakan panjang dari sudut rotasi lengan pusat massa. Lengan memiliki momen inersia I_1 dan I_2 . Setiap rotasi sendi teredam dengan koefisien redaman C_1 dan C_2 , di mana C_1 adalah redaman disediakan oleh bantalan motor dan C_2 adalah redaman yang timbul dari kopel antara lengan 1 dan lengan 2. Skema pendulum terbalik ditunjukkan dalam Gambar 1. [3]



Gambar 1 Skema Pendulum Terbalik

a. Model Fisika

Berikut adalah gambar skematik dari pendulum terbalik beserta arah pergerakannya:



Gambar 2 Skematik dari pendulum terbalik beserta arah pergerakannya

Kecepatan angular dari masing - masing link diberikan oleh :

$$\bar{\omega}_1 = \dot{\theta}_1 \hat{k}$$

$$\bar{\omega}_1 = -\dot{\theta}_1 \cos \theta_2 \hat{i} - \dot{\theta}_1 \sin \theta_2 \hat{j} + \dot{\theta}_2 \hat{k}$$

Kecepatan linier dari masing - masing link diberikan oleh :

$$\bar{v}_{1c} = \dot{\theta}_1 l_1 \hat{j}$$

$$\bar{v}_{2c} = \dot{\theta}_1 L_1 \sin \theta_2 \hat{i} + (\dot{\theta}_2 l_2 + \dot{\theta}_1 L_1 \cos \theta_2) \hat{j} - l_2 \dot{\theta}_1 \sin \theta_2 \hat{k}$$

Torsi dari Motor DC

Motor DC permanen menghasilkan gaya gerak listrik E_a . Dimana E_a berbanding lurus dengan kecepatan rotor yang dinyatakan sebagai berikut

$$E_a = K_v \omega_r = K_v \dot{\theta}_1 \quad \dots\dots\dots (1)$$

Torsi yang dihasilkan oleh motor DC berbanding lurus dengan arus rotor dinyatakan sebagai berikut :

$$\tau_e = K_t I_a = K_v I_a \quad \dots\dots\dots (2)$$

Dengan K_v adalah konstanta untuk tegangan dan K_t adalah konstanta untuk torsi. Dalam kondisi *steady state*, persamaan yang menggambarkan tegangan motor adalah :

$$V_a = R_a I_a + E_a, \text{ sehingga}$$

$$I_a = \frac{V_a}{R_a} - \frac{E_a}{R_a} \quad \dots\dots\dots (3)$$

Substitusikan persamaan (3) dan (1) ke persamaan (2) ,

$$\tau_e = \frac{K_t V_a}{R_a} - \frac{K_t K_v \dot{\theta}_1}{R_a} \quad \dots\dots\dots (4)$$

di mana, V_a adalah tegangan dc yang diterapkan. Dua pertimbangan utama dalam memilih motor adalah untuk menciptakan torsi tinggi dan kecepatan tinggi. Torsi diperlukan untuk lengan putar untuk mengubah arah rotasi dengan cepat dalam rangka untuk menjaga keseimbangan pendulum. Dan kecepatan tinggi diperlukan sedemikian hingga lengan dapat bergerak lebih cepat untuk mencegah jatuhnya pendulum. [3]

b. Model Matematis

Penurunan persamaan matematika yang menjelaskan dinamika dari sistem pendulum terbalik di dasari oleh persamaan Euler Lagrange:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} + \frac{\partial W}{\partial q_i} = Q_i \quad \dots\dots\dots (5)$$

Di mana,

$q_i(t)$ = vektor posisi angular (rad)

$\dot{q}_i(t)$ = vektor kecepatan angular (rad/s)

Q_i = gaya luar (N)

L = Lagrangian (J)

W = energi yang hilang (J)

Dalam persamaan Euler Lagrange, L didefinisikan sebagai ;

$$L(q, \dot{q}) = E_{k \text{ total}} - E_{p \text{ total}} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\text{dan } q_i = [\theta_1, \theta_2]^T$$

Energi kinetik dari link 1 adalah :

$$E_{k \text{ link1}} = \frac{1}{2} m_1 l_1^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} I_{1zz} \dot{\theta}_1^2$$

$I_1 = 0$, karena pusat massa dari lengan seimbang pada titik awal, sedemikian hingga

$$E_{k \text{ link1}} = \frac{1}{2} I_1 \dot{\theta}_1^2$$

Energi kinetik dari link 2:

$$E_{k \text{ link2}} = \frac{1}{2} \dot{\theta}_1^2 \left(m_2 L_1^2 + \sin^2(\theta_2) (m_2 l_2^2 + I_{2yy}) + I_{2xx} \cos^2(\theta_2) \right)$$

$$+ \frac{1}{2} \dot{\theta}_1^2 (I_{2zz} + m_2 l_2^2) + m_2 L_1 l_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \cos \theta_2$$

Energi potensial dari link 1 dan link 2 adalah :

$$E_{p \text{ link1}} = 0$$

$$E_{p \text{ link2}} = m_2 g l_2 \cos \theta_2$$

Total energi yang hilang dari sistem adalah jumlahan energi yang hilang dari pendulum dan lengan atau link 1:

$$W = \frac{1}{2} C_1 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} C_2 \dot{\theta}_2^2 \quad \dots\dots\dots (7)$$

Dari persamaan (6), maka Lagrangian didapat:

$$L = \frac{1}{2} I_1 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} I_2 \dot{\theta}_2^2 + \frac{1}{2} m_2 \left[(L_1 \dot{\theta}_1 + l_2 \dot{\theta}_2 \cos \theta_2)^2 + (l_2 \dot{\theta}_2 \sin \theta_2)^2 \right] - m_2 g l_2 \cos \theta_2 \quad \dots\dots\dots (8)$$

Persamaan Euler-Lagrange dari masing - masing variabel adalah :

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_1} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_1} + \frac{\partial W}{\partial \theta_1} = \tau_e$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_2} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_2} + \frac{\partial W}{\partial \theta_2} = 0$$

Masukkan persamaan (4), (7), dan (8) ke dalam persamaan Euler-Lagrange, sehingga akan didapatkan persamaan non linear dari dinamika pendulum terbalik sebagai berikut :

$$(I_1 + m_2 L_1^2) \ddot{\theta}_1 + (m_2 L_1 l_2 \cos \theta_2) \ddot{\theta}_2 + (m_2 L_1 l_2 \sin \theta_2) \dot{\theta}_2^2 + C_1 \dot{\theta}_1 = \frac{K_t V_a}{R_a} - \frac{K_t K_v \dot{\theta}_1}{R_a} \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$(m_2 L_1 l_2 \cos \theta_2) \ddot{\theta}_1 + (I_2 + m_2 l_2^2) \ddot{\theta}_2 + m_2 g l_2 \sin \theta_2 + C_2 \dot{\theta}_2 = 0 \quad \dots\dots\dots (10)$$

Untuk melinearkan model yang telah didapatkan, digunakan pendekatan sebagai berikut : $\cos \theta \approx 1, \sin \theta \approx \theta, \dot{\theta}^2 \approx 0$

Sehingga persamaan (9) dan (8) menjadi :

$$h_1 \ddot{\theta}_1 + h_2 \ddot{\theta}_2 + C_1 \dot{\theta}_1 = h_5 V_a - h_6 \dot{\theta}_1$$

$$h_2 \ddot{\theta}_1 + h_3 \ddot{\theta}_2 + h_4 \dot{\theta}_2 + C_2 \dot{\theta}_1 = 0$$

Dimana didefinisikan :

$$h_1 = I_1 + m_2 L_1^2 \quad h_2 = m_2 L_1 l_2$$

$$h_3 = I_2 + m_2 L_2^2 \quad h_4 = m_2 g l_2$$

$$h_5 = \frac{K_t}{R_a} \quad h_6 = \frac{K_t K_v}{R_a}$$

Dengan eliminasi, diperoleh persamaan :

$$\ddot{\theta}_1 = \frac{-h_3(h_6 + C_1)\dot{\theta}_1 - h_2 h_4 \theta_2 + h_2 C_2 \dot{\theta}_2 + h_3 h_5 V_a}{h_1 h_3 - h_2^2} \quad (11)$$

$$\ddot{\theta}_2 = \frac{h_2(h_6 + C_1)\dot{\theta}_1 - h_1 h_4 \theta_2 + h_1 C_2 \dot{\theta}_2 + h_2 h_5 V_a}{h_1 h_3 - h_2^2} \quad (12)$$

Misalkan,

$$H = \begin{bmatrix} h_1 & -h_2 \\ -h_2 & h_3 \end{bmatrix}, \det[H] = h_1 h_3 - h_2^2$$

$$d_1 = \frac{h_3}{\det[H]} \quad d_2 = -\frac{h_2}{\det[H]}$$

$$d_3 = -\frac{h_2}{\det[H]} \quad d_4 = \frac{h_1}{\det[H]}$$

Sehingga persamaan (10) dan (11)

dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\ddot{\theta}_1 = -d_1(h_6 + C_1)\dot{\theta}_1 - d_2 h_4 \theta_2 - d_2 C_2 \dot{\theta}_2 + d_1 h_5 V_a \quad (13)$$

$$\ddot{\theta}_2 = -d_3(h_6 + C_1)\dot{\theta}_1 - d_4 h_4 \theta_2 - d_4 C_2 \dot{\theta}_2 + d_3 h_5 V_a \quad (14)$$

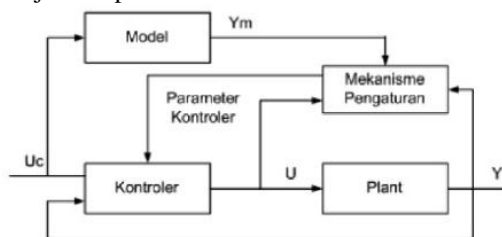
Persamaan keadaan dan output dari pergerakan pendulum terbalik, yaitu:

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -d_1(h_6 + C_1) & -d_2 h_4 & -d_2 C_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -d_3(h_6 + C_1) & -d_4 h_4 & -d_4 C_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ d_1 h_5 \\ 0 \\ d_3 h_5 \end{bmatrix} \quad (15)$$

B. Model Reference Adaptive Systems (MRAS)

Sistem kontrol adaptif adalah sistem kontrol dimana parameter-parameternya dapat diatur dan juga memiliki mekanisme untuk mengatur parameter-parameter tersebut. *Model Reference Adaptive Systems (MRAS)* merupakan salah satu kendali adaptif yang diperkenalkan pertama kali oleh Whitaker pada tahun 1958.[4]

Ide dasar MRAS adalah membuat keluaran sistem yang diatur sedemikian rupa sehingga mempunyai perilaku yang sama dengan model referensi yang diberikan. Hal ini dilakukan dengan mengubah-ubah nilai parameter kontrolernya. Parameter-parameter kontroler diatur melalui mekanisme pengaturan yang didasarkan pada *error* yang merupakan selisih antara keluaran proses dengan keluaran model referensi. Blok diagram skema *Model Reference Adaptive Systems (MRAS)* ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 3 Blok diagram Model Reference Adaptive Systems (MRAS)

Skema sistem MRAS memiliki dua *loop* yaitu *loop* pertama (*inner loop*) adalah *loop* umpan balik antara proses dan kontroler, sedangkan *loop* kedua (*outer loop*) adalah *loop* yang mengubah parameter-parameter kontroler berdasarkan sinyal *error* $e = y - y_m$. Pengaturan dilakukan dengan meminimalkan sinyal *error*, sehingga keluaran sistem (y) sesuai dengan keluaran model referensinya (y_m). Mekanisme pengaturan pada MRAS terhadap parameter-parameternya dapat dilakukan dengan MIT Rule.

a. MIT Rule

Berikut ini akan dijabarkan MIT Rule pada sistem *loop* tertutup yang mana kontrolernya memiliki sebuah parameter yang dapat diatur berupa θ . *Error* dinotasikan sebagai e . Pengaturan parameter kontroler dilakukan dengan meminimalkan fungsi kerugian (*the loss function*, $J(\theta)$):

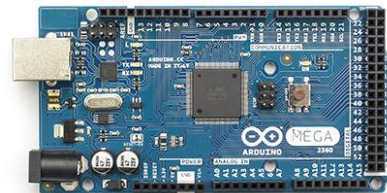
$$J(\theta) = \frac{1}{2} e^2 \quad (16)$$

Agar J bernilai kecil dilakukan perubahan parameter pada *gradient* negative dari J :

$$\frac{d\theta}{dt} = -\gamma \frac{dJ}{d\theta} = -\gamma e \frac{de}{d\theta} \quad (17)$$

C. Arduino Mega2560

Arduino Mega merupakan sebuah mikrokontroler berdasarkan ATmega2560, memiliki 54 digital input/ outputpin (yang 14 dapat digunakan sebagai output PWM), input analog 16, 4 UART (*port serial hardware*), osilator kristal 16 MHz, koneksi USB, jack listrik, header ICSP, dan tombol reset.



Gambar 4 Arduino Mega2560

III. PERANCANGAN MODUL

A. Spesifikasi Alat

Spesifikasi alat yang dirancang yaitu:

1. Sistem penggerak menggunakan motor DC dengan catu daya 12V.
2. Menggunakan catu daya 5V untuk catu *driver* motor EMS 5A H-Bridge.
3. Tongkat pendulum (*rod*) berbahan aluminium dengan berat 200 g dan panjang 30 cm.
4. Panjang lengan pendulum / *chart* 15 cm.

B. Mekanik

Bentuk *rotary inverted pendulum* dapat dilihat di Gambar 5 berikut:



Gambar 5 Rotary Inverted Pendulum

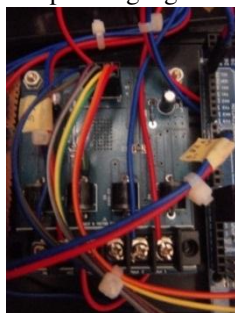
Berikut merupakan Tabel 1 parameter dari rotary inverted pendulum yang digunakan:

Tabel 1 Parameter pada Rotary Inverted Pendulum

Parameter	Nilai	Parameter	Nilai
m_1 (kg)	0,7	I_1 (kg m ²)	0,0525
m_2 (kg)	0,2	I_2 (kg m ²)	0,03
L_1 (m)	0,15	g (m s ⁻²)	9,81
L_2 (m)	0,3	R_a (Ω)	22,6
C_1 (Nms)	0	K_v	0,014
C_2 (Nms)	0	K_t	0,014
		(N m A ⁻¹)	
l_2 (m)	0,2	V_a (V)	12

C. Perancangan Driver Motor

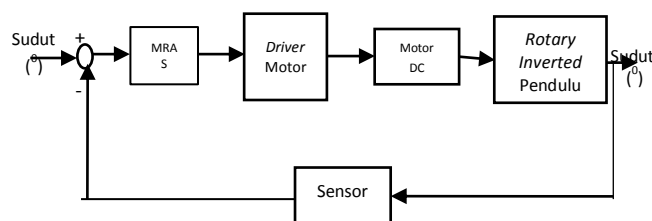
Driver motor DC menggunakan *Embedded Module Series* (EMS) 5A H-Bridge yang menggunakan IC MC33887VW. Modul ini merupakan driver H-Bridge yang dirancang untuk menghasilkan drive 2 arah dengan arus kontinyu sampai dengan 5A pada tegangan 5V-40V.



Gambar 6 Rangkaian Driver Motor EMS H-Bridge 5A

D. Perangkat Lunak

Diagram blok sistem ditunjukkan pada gambar berikut:



Gambar 7 Diagram Blok Sistem

E. Perancangan MRAS

1. Model Matematis Sistem

Berdasarkan persamaan 15 dapat diperoleh model matematis sistem dengan memasukkan nilai parameter sistem ke persamaan tersebut. Sehingga didapat fungsi alih *state space* yaitu:

$$T(s) = \frac{0.01105s^2 + 0.1141}{s^4 + 0.0001547s^3 + 10.5s^2 + 0.001598s} \quad (18)$$

2. Reduksi Orde Model

Model matematis yang didapatkan berorde 4 yang termasuk orde tinggi, sehingga mengalami kesulitan untuk mendesain model referensi pada MRAS. Sehingga perlu diselesaikan melalui pendekatan orde 2. Orde-n original sistem pada persamaan 18 disamakan terhadap orde-k pada reduksi orde model dengan parameter yang tidak diketahui, dimana persamaannya adalah

$$G_n(s) = R_k(s)$$

$$\frac{0.01105s^2 + 0.1141}{s^4 + 0.0001547s^3 + 10.5s^2 + 0.001598s} = \frac{d_0 + d_1s}{e_0 + e_1s + e_2s^2} \quad (19)$$

Dengan memisalkan $d_0=1$, didapatkan reduksi model orde 2 yaitu:

$$\frac{d_0 + d_1s}{e_0 + e_1s + e_2s^2} = \frac{1}{15,7654 + 0,14s + 90,4477s^2} \quad (20)$$

3. Penentuan Model Referensi

Fungsi alih model referensi ditentukan dengan kriteria sebagai berikut:

- Settling time* model referensi sebesar 0,25 detik.
- Prosentase *overshoot* tidak lebih dari 10% dari *output* respon.
- Derajat relatif model referensi adalah dua.

Sehingga didapatkan model referensi:

$$\frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} = \frac{308,59}{s^2 + 31,99s + 308,59} \quad (21)$$

4. Penentuan Hukum Adaptasi

Proses adaptasi berlangsung dengan adanya perubahan nilai parameter pengendali. Proses ini berlangsung selama terjadi *error* antara keluaran *plant* dengan keluaran model referensi. Proses adaptasi diatur melalui hukum adaptasi. *Rule*. Untuk mengatur parameter dengan meminimalisasi *loss function* (fungsi kerugian), J :

$$J(\theta) = \frac{1}{2}e^2 \quad (22)$$

Agar didapat nilai J yang kecil, maka merubah parameter dalam arah negative gradient dari J :

$$\frac{d\theta}{dt} = -\gamma \frac{\partial J}{\partial \theta} = -\gamma e \frac{\partial e}{\partial \theta} \quad (23)$$

$$e = y_p - y_m = kG(s)\theta u_c - k_o G(s)\theta u_c \quad (24)$$

$$\frac{\partial e}{\partial \theta} = kG(s)\theta u_c = \frac{k}{k_o} y_m \quad (25)$$

Sehingga MIT *Rule* memberikan hukum adaptasi:

$$\frac{d\theta}{dt} = -\gamma e \frac{k}{k_o} y_m \quad (26)$$

Dirubah menjadi domain-s:

$$s\theta = -\gamma e^{\frac{k}{k_o}} y_m \quad (27)$$

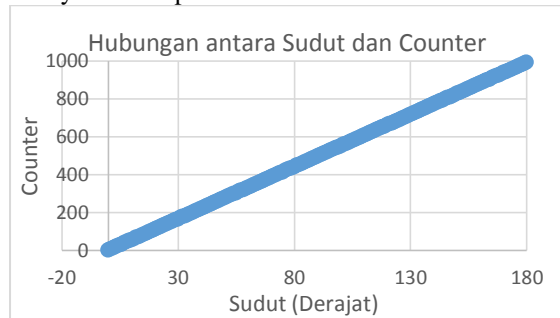
$$\theta = -\frac{1}{s} \gamma e^{\frac{k}{k_o}} y_m = -\frac{1}{s} \gamma e y_m \quad (28)$$

IV. PENGUJIAN DAN ANALISIS DATA

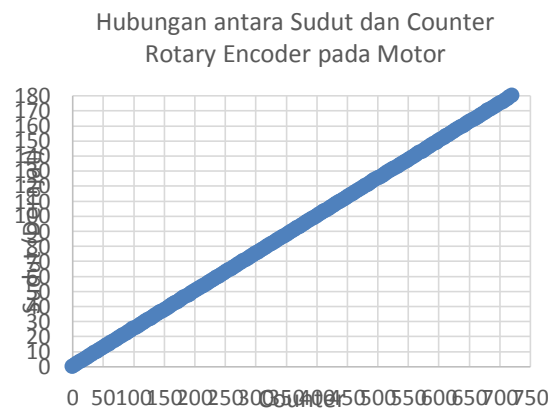
Pengujian alat meliputi pengujian rotary encoder, pengujian motor DC, pengujian driver motor, pengujian sistem secara keseluruhan.

A. Pengujian Rotary Encoder

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui pembacaan perubahan sudut dari rotary encoder dengan kecepatan dan percepatan dari rod pada rotary inverted pendulum.



Gambar 9 Grafik Hubungan antara Sudut dan Counter Rotary Encoder pada Rod

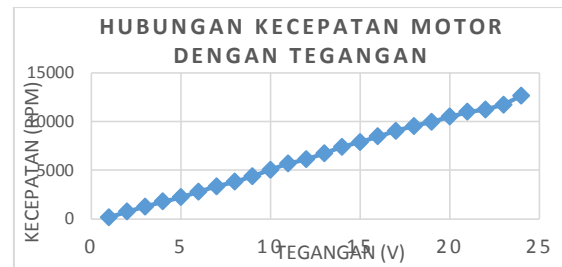


Gambar 10 Grafik Hubungan antara Sudut dan Counter Rotary Encoder pada Motor

Dari Gambar 9 dan gambar 10 dapat disimpulkan bahwa rotary encoder mempunyai kelinieran yang baik, sehingga ideal untuk digunakan sebagai pendeteksi kemiringan sudut dari rod dan posisi motor *Rotary Inverted Pendulum*.

B. Pengujian Motor DC

Bertujuan untuk mengetahui karakteristik motor DC yang digunakan pada sistem *Rotary Inverted Pendulum* terhadap tegangan.

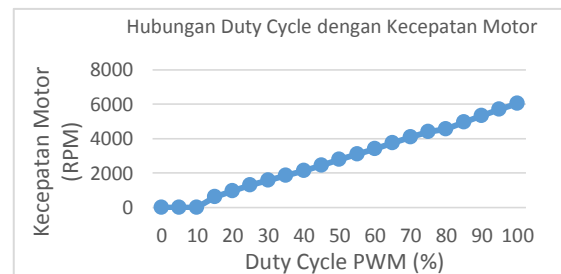


Gambar 11 Grafik tegangan motor terhadap kecepatan motor

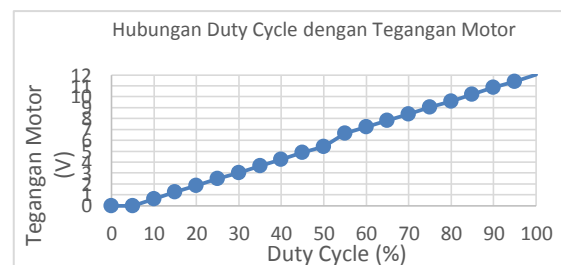
Dari Gambar 11 dapat disimpulkan bahwa motor akan berputar secara linear sesuai dengan perubahan tegangan. Sehingga motor DC tipe gml&2 24v ini cukup baik untuk diterapkan pada sistem *Rotary Inverted Pendulum*.

C. Pengujian Driver Motor

Bertujuan mengetahui *output* dari *driver* motor apabila diberi *input* yang berbeda-beda.



Gambar 12 Hubungan Antara *Duty Cycle* dengan Kecepatan Motor



Gambar 13 Hubungan *Duty Cycle* dengan Tegangan Motor

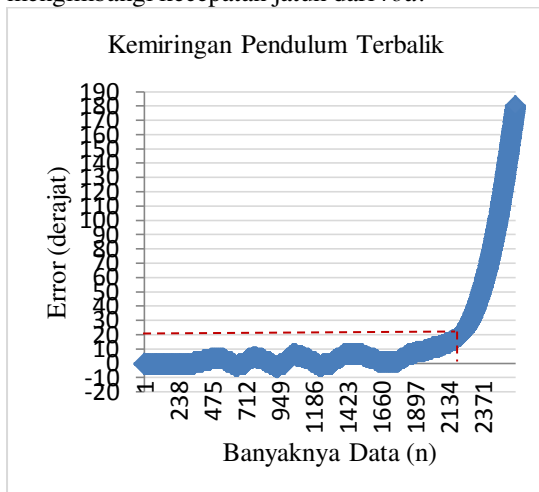
Motor akan mulai bergerak ketika *duty cycle* bernilai 15%. Tegangan motor dan *duty cycle* memiliki hubungan yang linier. Berdasarkan data-data tersebut driver motor EMS 5A H-Bridge memiliki kemampuan yang baik untuk men-drive motor DC

D. Pengujian Keseluruhan Sistem

Bertujuan untuk mengetahui kerja dari perangkat keras dan perangkat lunak setelah diintegrasikan dalam sebuah sistem terpadu.

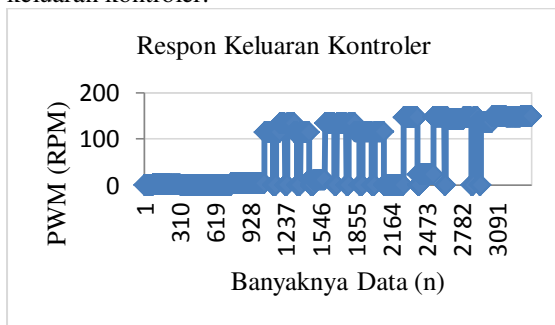
Berdasarkan Gambar 14 dapat dilihat ketika sudut kemiringan tersebut melebihi dari batas sudut yang telah ditentukan yaitu $\pm 20^\circ$, maka sistem tersebut akan *collapse* atau kontroler sudah tidak dapat memberikan aksi kontrol karena kemampuan

aktuator berupa sebuah motor sudah tidak dapat mengimbangi kecepatan jatuh dari *rod*.

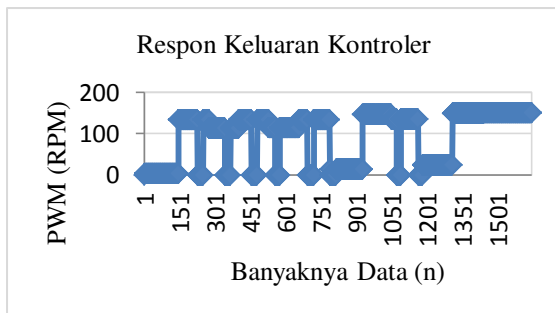


Gambar 14 Grafik Kemiringan Pendulum Terbalik (Error)

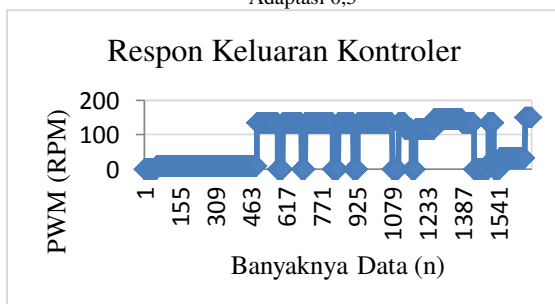
Pada penelitian ini digunakan *gain* adaptasi yang berbeda yaitu sebesar 0,25; 0,5; 0,75; dan 1. Berikut Gambar 15-18 merupakan hasil respon keluaran kontroler.



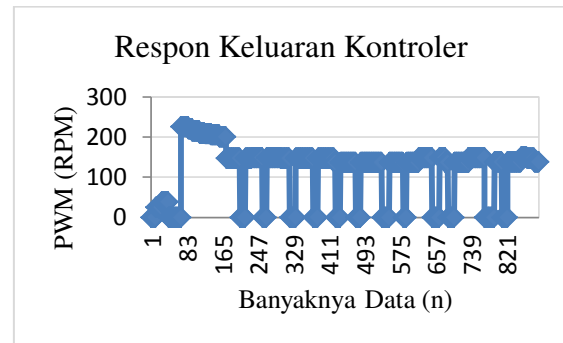
Gambar 15 Respon Keluaran Kontroler dengan Gain Adaptasi 0,25



Gambar 16 Respon Keluaran Kontroler dengan Gain Adaptasi 0,5



Gambar 17 Respon Keluaran Kontroler dengan Gain Adaptasi 0,75



Gambar 17 Respon Keluaran Kontroler dengan Gain Adaptasi 1

Berdasarkan pengujian dapat dilihat bahwa keluaran kontroler berupa PWM dan pendulum terbalik dapat mempertahankan kestabilannya selama 4 detik.

V. KESIMPULAN DAN PROSPEK

Dari perancangan, pengujian dan pengamatan yang telah dilakukan pada penelitian sistem ini, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. *Rotary Inverted Pendulum* dapat menjaga kestabilannya dengan bergerak ke kiri atau ke kanan sesuai arah kemiringannya dan memberikan respon seberapa besar kecepatan yang dibutuhkan untuk menjaga kestabilan.
2. Kestabilan *Rotary Inverted Pendulum* dapat bertahan rata-rata selama 4 detik.

Untuk perbaikan kinerja alat dan pengembangan lebih lanjut disarankan dilakukan metode pengontrolan MRAS dengan Teori Kestabilan *Lyapunov*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Indra, Ravi. 2011. *Perancangan Dan Pembuatan Rotary Inverted Pendulum Dengan Menggunakan Kontroller PID*. Malang: Universitas Brawijaya.
- [2] Nusantara G.D., Aziz M., Purwanto & Indra R.C. 2012. *Rancang Bangun Rotary Inverted Pendulum (RIP) dengan Menggunakan Kontrol PID*. Jurusan Teknik Elektro. Universitas Brawijaya.
- [3] Stephani, Herlina. 2010. *Pengendalian Optimal Untuk Furuta Pendulum*. Jurnal Matematika Fakultas MIPA Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- [4] Butler, H. 1992. *Model Reference Adaptive Systems, From Theory to Practice*. UK : Prentice-Hall, Inc.